徳島水研報第8号
Bull. Tokushima. Pref. Fish. Res. Ins. No. 8 , 7 - 11 (2012)

紀伊水道における冬季の外海底層からの北太平洋中層系水の流入

鎌田信一郎[*1]，天真正勝[*1*2]，上田幸男[*3]

Intrusion of water mass derived from North Pacific Intermediate Water from the lower layer flowing into the Kii Channel in winter

Shinichirou KAMATA[*1], Masakatsu TENJIN[*1*2], Yukio UETA[*3]

Recently, yield and production by marine algal cultivation have shown a tendency to fall because of the reduction of nutrients in the sea water around Tokushima Prefecture. It has been unclear whether this is caused by water from the Seto Inland Sea or North Pacific Intermediate Water (NPIW). In order to investigate the intrusion of dissolved inorganic nutrients into Harima nada and Kii Channel, we analyzed the water quality at 9 stations off Tokushima Prefecture from January to March 2011.In February 2011 , we initially observed the water mass with high salinity (above 33psu) and with a high concentration of DIN (3～5μmol/L) derived from NPIW intruding into the bottom layer of Kii Channel, when the northern edge of the Kuroshio path was more than 38 miles off Shiono Cape.

キーワード：紀伊水道，北太平洋中層系水，NPIW，黒潮，離岸

徳島県沿岸において，藻類養殖は，主として栄養豊富な内海系水もしくは河川水が流入する播磨灘および紀伊水道で行われている。徳島県の藻類養殖業における年間生産金額は，ワカメで1992年に23億円，ノリで2000年に28億円で最盛期に達した後，平成19年にはワカメが4億円，ノリが11億円まで大きく減少した（漁業・養殖統計年報平成元年，平成19年，ノリ共販結果昭和59年，平成19年）。このノリとワカメの生産金額の減少は，漁場における冬季の水温上昇や海水中の無機態栄養塩の不足により色落ち現象が生じ，良質なノリ，ワカメを生産できる年が減少しているためと報告されている（加藤2010）。

実際，瀬戸内海全域では，1990年代中頃以降，溶存態無機窒素の濃度が低下している（樽谷2006）。また，近年，播磨灘（住友2011）と紀伊水道（石田．上田2008，鎌田ほか2009）で透明度と水温が上昇し，海の生産力が低下していることが指摘されている。これらは，河口域や沿岸域で顕著にみられる現象ながら，河川水や内海系水の影響のみならず，紀伊水道沖における黒潮の離接岸に伴い栄養塩が豊富な北太平洋中層水（NPIW：North Pacific Intermediate Water）流入の影響も大きいと考えられている（藤原ほか2003）。実際，紀伊水道沖では，夏期に潮岬沖で黒潮が38マイル以上離岸するとNPIWが紀伊水道の底層へ流入することが知られており（Takashi et al.,2006，竹内ほか1997），NPIWが紀伊水道の栄養塩の多寡に影響を及ぼすことが報告されている（藤原ほか2006）。

つまり，瀬戸内海東部海域には主として内海性の陸由来である栄養塩と，外洋性のNPIW由来の栄養塩が流入しているため，双方の影響度を把握することが，本海域で栄養塩管理を行うために不可欠となる。

そこで，本研究では，播磨灘から紀伊水道における栄養塩の流入過程を明らかにするため，2011年1～3月に播磨灘から紀伊水道に9定点を設け，水温，塩分および栄養塩の垂直断面観測を実施した。

なお，本調査は水産庁委託事業平成22年度新たなノリの色落ち対策技術開発のうち「沿岸海域の栄養塩管理技術の開発委託事業」により実施した。

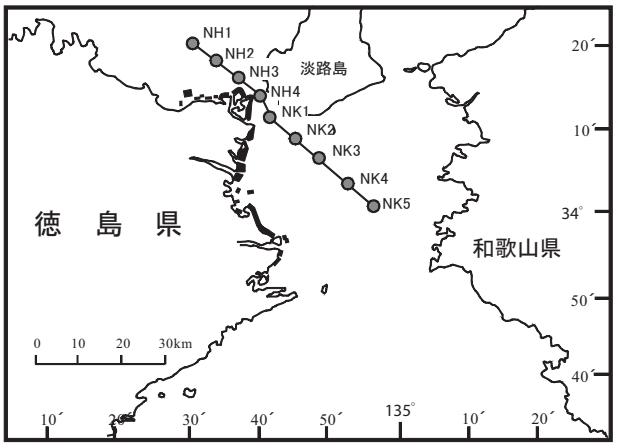

図1　観測定点図。灰色丸が定点。徳島県沿岸の黒色着色が藻類養殖漁場。

*1 徳島県立農林水産総合技術支援センター水産研究所美波庁舎(Fisheries Research Institute Minami Branch, Tokushima Agriculture, Forestry, and Fisheries Technology Support Center, Hiwasaura Minami, Kaifu, Tokushima 779-2304, Japan)
*2 現在は徳島県南部総合県民局農林水産部
*3 徳島県立農林水産総合技術支援センター水産研究所鳴門庁舎(Fisheries Research Institute Naruto Branch, Tokushima Agriculture, Forestry, and Fisheries Technology Support Center, Dounoura, Seto, Naruto, Tokushima 771-0361, Japan)

表１　観測実施日

観測定点	2011年1月	2011年2月	2011年3月
NH1～NH4	荒天欠測	8	10
NK1～NK5	26	16	8

材料と方法

観測定点および観測水深

2011年1～3月に播磨灘から紀伊水道に至る南北縦断観測9定点(NH１～NK5）において海洋観測と採水を実施した(図１，表1)。

NH１～4では鳴門町漁業協同組合で漁船を傭船し，JFEアドバンテック社製クロロテックACL215DKで水温，塩分を観測し，北原式採水器を用いて水深0，10，20および30mで採水を実施した。NK１～5では漁業調査船「とくしま」（80t，1200馬力）に搭載したFSI社製CTDで水温，塩分を観測するとともに，オクトパス採水装置により水深0，10，20，30，40，50および60mで採水を実施した。

無機態栄養塩

試水をGF/C（直径47mm，Whatman社）でろ過し，100mLのアイボーイ角瓶（アズワン）に分注し-25℃で冷凍保管した。冷凍保管した試水を，2ヶ月以内にSWAAT-5ch（ビーエルテック社）により栄養塩(PO4-P，NO3-N，NO2-N，NH4-NおよびSiO2-Si)分析に供した。

データの解析

各調査月毎に水温，塩分および各栄養塩の鉛直断面図を作成した。また，栄養塩の由来を明らかにする目的で，播磨灘と紀伊水道における塩分とDINおよび塩分とPO4-Pの散布図を作成した。

海上保安庁海洋情報部海洋情報課が発行する黒潮詳細情報の数値情報（http://www1.kaiho.mlit.go.jp/KANKYO/KAIYO/qboc/kuroshio_axis.xls）から，2011年1～3月の潮岬から黒潮北縁に至る離岸距離を調べた。

結　果

鉛直断面観測

2011年1月にはNK3の50m層からNK5の60m層にかけて11～13℃台，33.2～33.8psuの相対的に高温，高塩分の外海水の流入がみられた（図2）。NK1からNK2のDINは1～2μmol/Lで，NK3～5では3μmol/L以上であった。PO4-P およびSiO2も同様の傾向を示し，外海ほど高い傾向がみられた。

2011年2月には，鉛直混合によりNH1から紀伊水道のNK4の水深40mにおいて，水温，塩分は8～9℃台，32.8～33psuとなった（図3）。紀伊水道のNK3の40m層からNK5の60m層

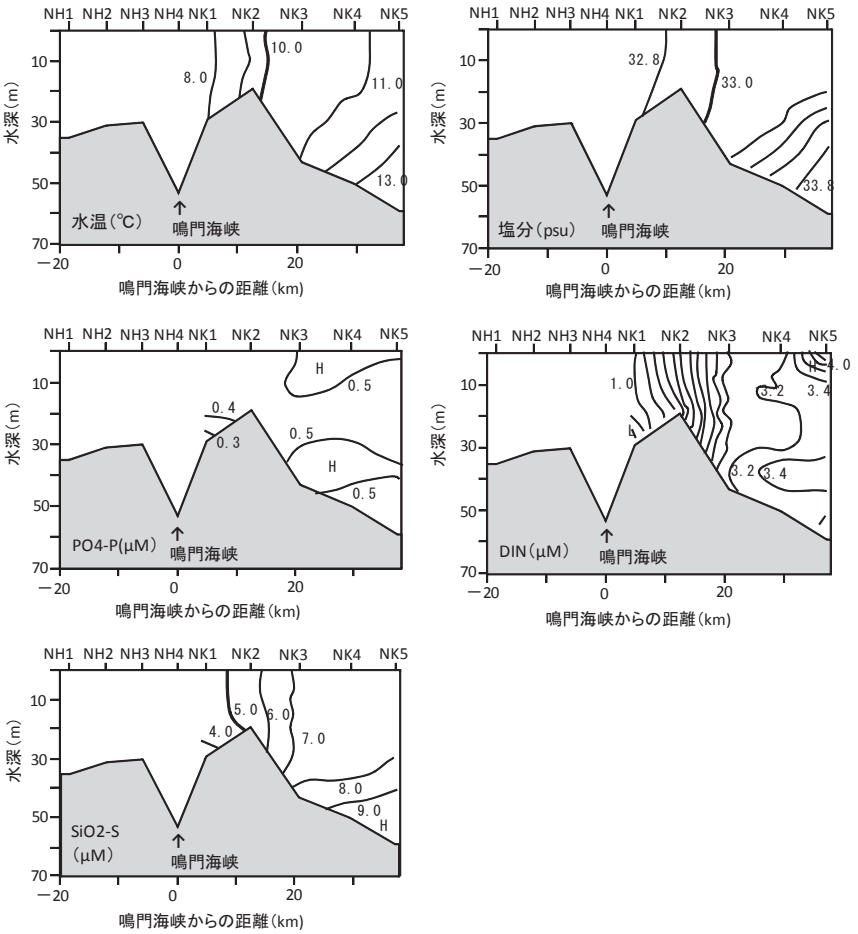

図2　２０１１年1月における水温，塩分，リン酸，ＤＩＮおよびケイ酸の鉛直分布図

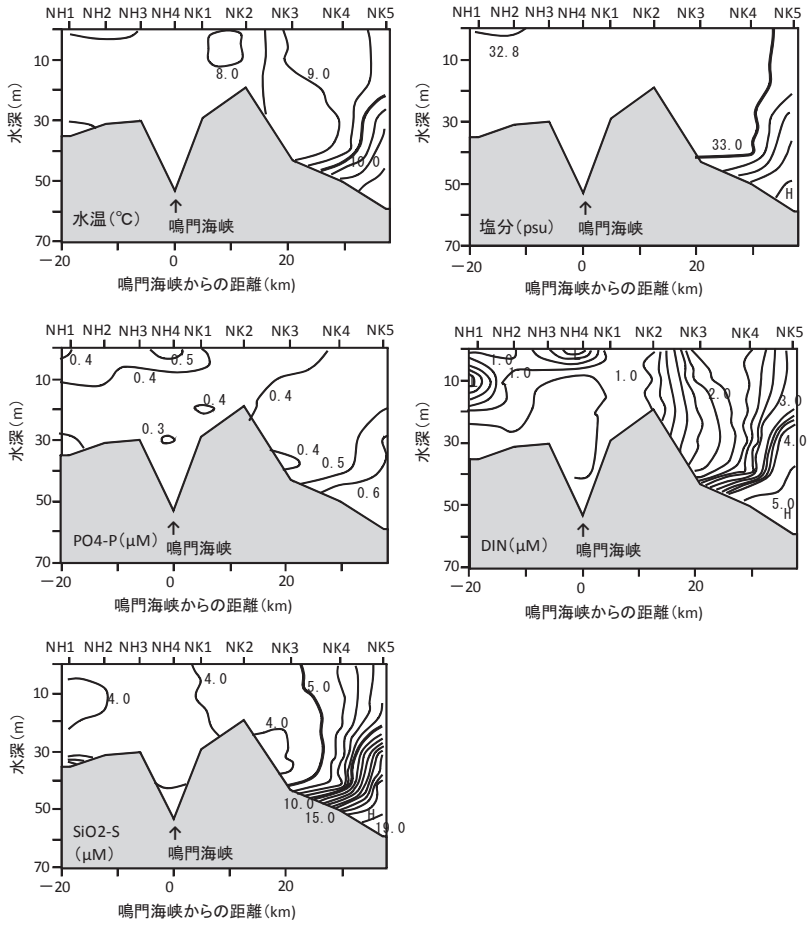

図3　２０１１年2月における水温，塩分，リン酸，ＤＩＮおよびケイ酸の鉛直分布図

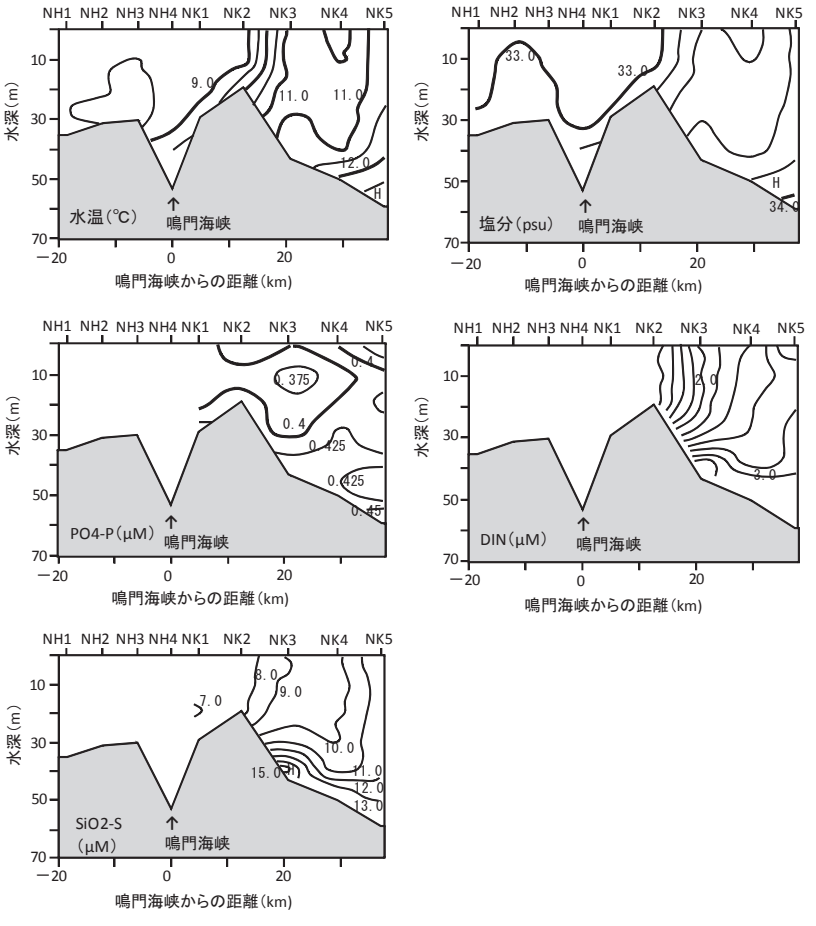

図4　２０１１年3月における水温，塩分，リン酸，ＤＩＮおよびケイ酸の鉛直分布図

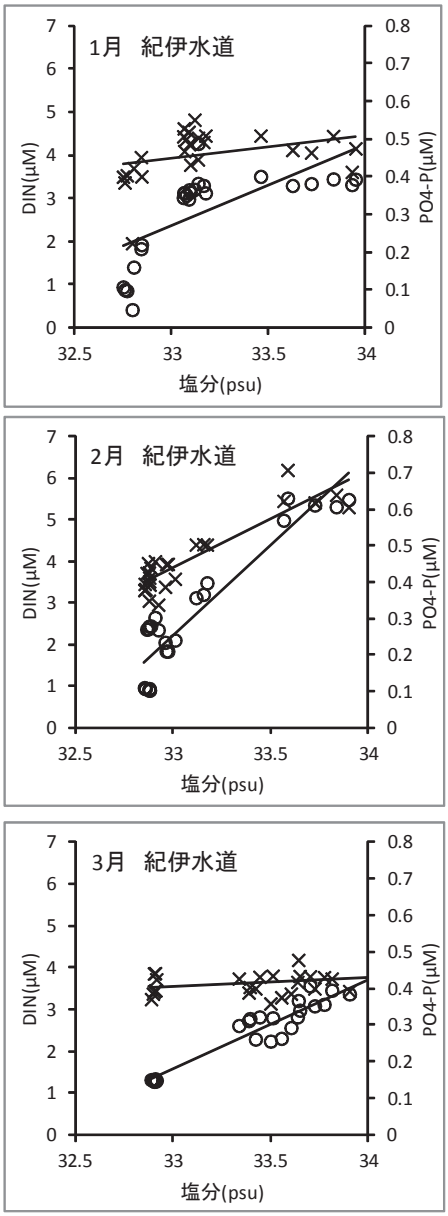

図5　塩分と無機態栄養塩の相関関係。白丸がＤＩＮ，×がPO4-Pを示す。

にかけて10℃以上，33psu以上の外海水の流入がみられた。水温，塩分同様にNK3の40m層からNK5の60m層にかけてDINで3μmol/L，PO4-Pで0.5μmol/L，Si02で10μmol/L以上の高濃度の栄養塩の外海底層からの波及がみられた。

2011年3月にはNH3からNK2の水温，塩分は9℃，33psu前後，NK2からNK5では外海深部ほど水温，塩分ともに高い傾向を示した（図4）。NK2からNK5の水温については2月ほど顕著ではないが外海深部ほど高い傾向を示した。

栄養塩と塩分の相関関係

播磨灘では，塩分とDIN間で有意な関係がみられなかった（r=-0.19～0.12，P>0.05）。また，塩分とPO4-Pについても同様に，全ての月で有意な相関関係がみられなかった(r=0.03～0.02，p>0.05，図5)。これに対し，紀伊水道

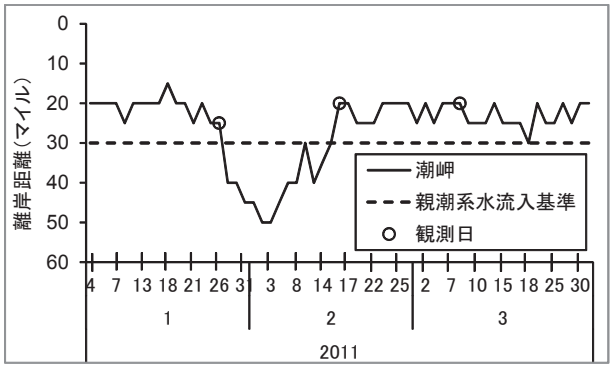

図6　２０１１年１～３月の潮岬沖における黒潮流軸の離岸距離の推移。海上保安庁海洋情報部海洋情報課が発行する黒潮詳細情報の数値情報http://www1.kaiho.mlit.go.jp/KANKYO/KAIYO/qboc/kuroshio_axis.xlsより。

では1～3月には塩分とDIN間で有意な正の相関関係がみられた(r=0.65～0.94，p<0.05)。PO4-Pにおいても，2～3月に有意な正の相関関係がみられた(r=0.33～0.91，p<0.05)。

潮岬沖における黒潮の動向

潮岬における黒潮は2011年1月26日に離岸を開始し，2月1日に北縁が50マイルに達した後，2月16日には20マイルに戻り，接岸状態になった(図6)。このため，1月の観測日は離岸開始時，2月の観測日は離岸から接岸状態に戻る状態，3月は接岸状態にあると判断した。

考　察

2011年1～3月にNK3からNK5の紀伊水道南部の定点において，相対的に高塩分かつ高栄養塩濃度の水塊が出現し，塩分と栄養塩に明瞭な正の相関が認められた。2011年1～3月に，NK3からNK5の底層では，最高，DINが5μmol/L台，PO4-Pが0.6μmol/L台を記録した。一般に，紀伊水道の通常の水質は，貧栄養な黒潮系水が潮岬沖から紀伊半島沿いに分岐流として流入するため（殿谷1979），内海域や河口域に較べて貧栄養である。とりわけ，NK3からNK5は，その影響を強く受けることから，高温，高塩分および貧栄養化傾向になりやすい。なぜ，このような高塩分かつ高栄養塩濃度の水塊が紀伊水道底層に流入したのか，内海系水の影響，北太平洋中層水（NPIW）の影響および黒潮の動向から考察する。

まず，2月の鉛直分布図(図3)から，南部の定点は北部の定点に較べて相対的に高い水温，塩分を呈したことから，外海系水の影響を受けた可能性が高いと考えられる。また，NK5の水深60mではNK5と同一地点であり浅海定線調査の観測点であるK11の60m層と比較して，過去2番目に低い水温(11.9℃)が観測されたことから，外海の底層から冷たい水塊が流入した可能性が強いと考えられる。

これまでの研究では，紀伊水道に隣接する太平洋の水深300～800mには，低水温・低塩分かつ高栄養塩なNPIWが広がり（Nakano *et al*. 2005, Reid 1965），夏期に潮岬沖で黒潮が39マイル程度離岸すると紀伊水道の底層へNPIWが密度流として流入することが報告されている（Takashi *et al*. 2006，竹内ほか1997）。一方で高志ほか（2002）は，紀伊水道およびその外域において冬期の栄養塩動態を調べ，紀伊水道での水道口で冬期に発達する熱塩フロントにより外海から陸棚斜面水やNPIWが流入しないことを報告している。

2011年1～3月における潮岬沖の黒潮流軸の離岸距離を(図6)をみると，1月下旬から2月中旬には黒潮は30～50マイル離岸している。とりわけ，2月16日のNK1～5の観測日には離岸状態から接岸状態に戻る過程にあり，39マイル程度離岸している。また，水温と塩分の鉛直分布図から水道口で10℃前後の弱いフロントは形成されているが，黒潮が離岸しているため熱塩フロントは形成されていないと考えられる。このことから，黒潮が離岸から接岸に戻る過程で陸棚斜面水もしくはNPIWに由来する水塊が紀伊水道内に流入したと考えられる。1月26日は離岸の開始時期であり，外海からの栄養塩の流入の兆候がみられ，3月には黒潮は接岸状態に戻っているが，NK3からNK5の底層に3μmol/Lを超える相対的に栄養塩濃度の高いNPIWに由来する水塊の一部が残存しているものと考えられる。

一般にNPIWに含まれる栄養塩は，硝酸態窒素で20～40μmol/Lを呈し，今回紀伊水道でみられた水塊に比べ10倍以上高くなる。また，通常，NPIWの塩分は34.2psu以下とされている。しかし，今回観測されたDINおよびPO4-Pが高濃度な範囲における塩分は，33.8psu程度でかなり低かった。この原因として，NPIWが低塩分な内海系水と混合したため低塩分になったことが考えられた。つまり，冬期の紀伊水道海底付近には，NPIWと内海系水の混合水が流入している可能性が考えられる。

本研究では，紀伊水道で冬期にNPIWに由来する水塊が流入していることを初めて確認した。また，この水塊が紀伊水道沿岸の藻類養殖漁場に波及している可能性が示唆された。実際，この水塊の流入が確認された後、2011年の春季には，漁業者から，紀伊水道沿岸で，過去にみられたことが無いほどワカメが繁茂したとの報告がある(鎌田私信)。

本現象は，2011年2月の黒潮の離接岸現象のみで確認したもので，具体的にどのように紀伊水道に栄養塩が流入するかは不明である。また，引き続き，どの程度の頻度で，NPIWに由来する水塊が紀伊水道内へ流入するかモニタリングを継続する必要がある。さらに，安定同位体元素やアルカリ度などを指標にNPIWかその上層部にある陸棚斜面水かを検証し，動向を調べる必要がある。

引用文献

藤原建紀，小林志保，高志利宣．瀬戸内海の窒素・リンの輸送と起源の現地観測．海岸工学論文集2003；50：951-955.

藤原建紀，小林志保，國井麻妃，宇野奈津子．瀬戸内海に存在するリン・窒素量の経年変動．沿岸海洋研究2006；43：129-136.

石田鉄兵，上田幸男．徳島県海域の透明度の長期変動について～透明度から海の変化をみる～．黒潮の資源海洋研究2008；9；45-52.

加藤慎治，圍　昭紀．鳴門海域で養殖された国内8海域産のワカメ種苗の生長と形態．Algal Resources2010；3：19-26.

鎌田信一郎，吉村晃一,上田幸男．紀伊水道における透明度の変動について，歴史的資料を紐解く漁業との関連は?.水産海洋研究2009；73：218-220.

Nakano T., I.,Kaneko, M.,Endoh and M. Kamachi. Interannual and decadal variabilities of NPIW salinity minimuim core observed along JMA's hydrographic repeat sections. Journal of Oceanography2005；61：681-697.

Takashi　T., T. Fujiwara, T. Sumitomo and W. Sakamoto. Predition of slope water into the Kii Channel. Journal of Oceanography2006；62：105-113.

住友寿明.1999-2009年における徳島県北灘沿岸における水質およびプランクトン相の変化．徳島水研報2001；7：11-15.

竹内淳一，中地良樹，小久保友義．紀伊水道に進入する表層暖水と底層冷水．海と空1997；73：1-92.

樽谷 賢治．瀬戸内海の環境の30年間の変化?　水産の環境モニタリング"浅海定線観測調査"のとりまとめ．日本ベントス学会誌2007；62：52-56.

殿谷次郎．大型冷水塊形成による黒潮流及び徳島県沿海の海況変動．昭和54年度徳島県水産試験場事業報告1979，128-135.

Reid, J. L., Jr.. Intermediate waters of the Pacific Ocean. Johns Hopkins Oceanogr. Stud.1965；2：85.